

# 二次元角柱粗度を伴う粗面乱流において 高濃度土砂が大規模渦に与える影響

安達 幹治<sup>1</sup>・大本 照憲<sup>2</sup>・近藤 嘉人<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 熊本大学大学院自然科学教育部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号)  
E-mail: 190d9201@st.kumamoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (同上)  
E-mail: ohmoto@kumamoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup> 正会員 東京建設コンサルタント(株)九州支社 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 2-12-3)  
E-mail: konkon1410@outlook.jp

本研究は二次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂が乱流構造、大規模渦の発生機構に与える影響を明らかにすることを目的とする。そのため、高濃度土砂流の模擬流体として PSA 溶液を用い、流速の計測には PIV(Particle Image Velocimetry)を適用し、速度勾配テンソルの第 2 不変量である Q 定義法により大規模渦を同定し、その動特性を清水流との比較を通して詳細に検討した。解析結果から、高濃度土砂流では土砂濃度の増大により大規模渦の強度が弱まり、発生周期は長く、粗度頂部の剥離渦を抑制することが認められた。

**Key Words:** coherent vortex, non-Newtonian fluids, open channel flow, two-dimensional square ribs, PIV

## 1. はじめに

開水路における流れの抵抗は河床形態、粗度の大きさ・形状・配列、さらには流砂の存在、水理条件の影響を強く受ける。河道における流れの抵抗は河道、流砂および流れの相互作用系のマクロの結果として生じ、その機構の解明と予測手法の確立は、治水上最も重要な研究課題の一つである。その目的は、河川における水位と流量の関係さらには流砂量の予測精度の向上に繋がるが、経験則が主流であり普遍的メカニズムについては不明な点が多い。

実河川に見られる大規模な組織渦は、流れの抵抗、土砂輸送現象および河床形状との関係が深く、取分け河床波の存在が大規模渦の発生や乱流構造に与える影響は、多くの研究者によって検討された。

大規模渦構造を有するボイルの生成に関しては、古くは Matthes<sup>1)</sup>が河床から水面へ達する竜巻状の上昇渦をコルク渦と明記した。また Jackson<sup>2)</sup>は、観測から河床波の谷部においてボイルが生じやすく、その発生周期はバースティングと同程度であったことから、バースティングがボイルになると推測した。

Nezu and Nakagawa<sup>3)</sup>は直線河道に見られるボイルは、その発生機構より第 1 種から第 3 種に分類した。このう

ちバースト現象に起因する第 3 種は、河床形状にかかわらず形成され得るのに対し、第 1 種と第 2 種はそれぞれ流下方向と横断方向の河床波に起因するものと考えられている。河川のような高レイノルズ数流れでは、第 3 種は弱くなると見られることから、砂堆河床に出現するボイルは、主としてコルク渦に起因する第 1 種ボイルであることが予想される。

河川水面に間欠的に観察されるボイルを始めとした大規模渦構造については依然として不明な点が多く、高濃度土砂が大規模渦に与える影響について検討した研究事例は皆無に等しい。

大本ら<sup>4)</sup>は、二次元角柱粗度上の流れにおいて高濃度土砂が抵抗特性および流動機構に与える影響を検討した。その結果、図-1 に示す通り二次元角柱粗度における抵抗係数の土砂濃度依存性は、清水流に較べて Kaolin 体積土砂濃度  $C_v < 8.5\%$  で抵抗係数が小さくなり、土砂濃度  $C_v > 8.5\%$  では逆に抵抗係数が大きくなることを示した。

土砂濃度が流れ場において一様な場合には、支配方程式である Navier-Stokes 方程式は、密度には依存せず動粘性係数のみが支配因子となる。

また、大本ら<sup>4)</sup>は、高濃度土砂流と類似の動粘性係数を有するポリアクリル酸ソーダ (PSA) 溶液を用いた流れ場に粒子画像流速計法を適用して、清水流との比較によ

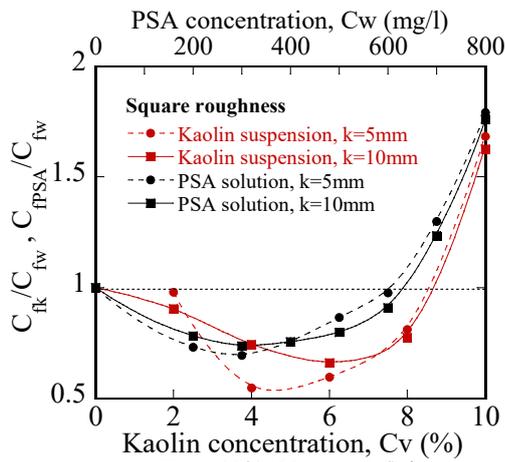


図-1 抵抗係数と土砂濃度

って高濃度土砂流の動力学特性を検討した。さらに、抵抗則を規定する運動量輸送<sup>4)</sup>およびエネルギー収支<sup>5)</sup>について詳細に検討した。

本研究では、二次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂が乱流構造、大規模渦の発生機構に与える影響を明らかにすることを目的とする。そのため、高濃度土砂流の模擬流体として PSA 溶液を用い、流速の計測には PIV(Particle Image Velocimetry)を適用し、速度勾配テンソルの第 2 不変量である Q 定義法により大規模渦を同定し、その動特性を清水流との比較を通して詳細に検討した。

## 2. 実験装置および方法

高濃度土砂が乱流構造および大規模渦の発生に与える影響を検討するために、二次元角柱粗度を有する開水路において流れの計測を実施した。実験装置および実験方法は前報<sup>9)</sup>と同様であり、流れの計測システムを図-2、粗度の縦断面記列を図-3 に示す。粗度材料は、ステンレス製からなる一辺  $k=a=10\text{mm}$  の正方形断面の角柱粗度を使用した。縦断方向の相対粗度間隔  $\lambda/k$  は、清水流において抵抗係数が最大値となった  $\lambda/k=10$  に設定した。座標系は流下方向を  $x$  軸、 $x_{RE}$  は粗度後縁からの流下距離、水路横断方向を  $y$  軸、鉛直上向きを  $z$  軸とし、それぞれに対応した平均流速成分を  $U, V, W$  変動成分を  $u', v', w'$  とする。

土砂濃度が流動機構に与える影響を検討した水理条件を表-1 に示す。なお、高濃度土砂流を模擬した PSA 溶液濃度  $C_w=300\text{ mg/l}$  および  $C_w=800\text{ mg/l}$  は、それぞれ、ほぼ同一の抵抗係数および粘性係数から試算すれば、それぞれ、Kaolin 体積土砂濃度  $C_v=6\%$  および  $10\%$  に相当する。

流速の計測には、非接触型の代表的な画像処理法である PIV 法を用いた。測定位置は、上流端より 5m 下流位置の等流場で行った。光源には空冷式の赤外線パルスレーザーを用い、シート光の厚さを 1mm、パルス間隔を 2000

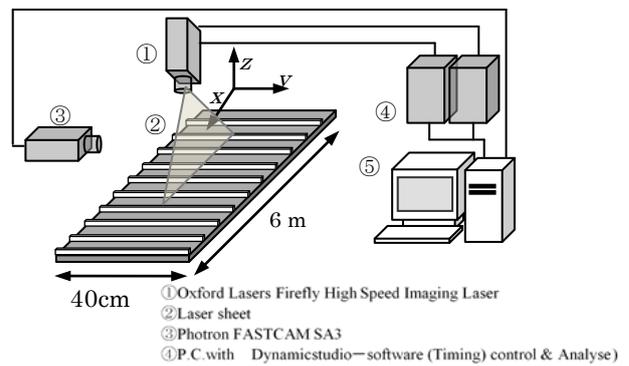


図-2 流れの計測システム

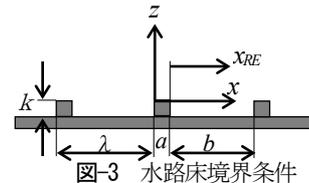


図-3 水路床境界条件

表-1 水理条件

|  | Case1 | Case2 | Case3 |
|--|-------|-------|-------|
| PSA concentration $C_w(\text{mg/l})$       | 0     | 300   | 800   |
| Discharge $Q(\text{l/s})$                  | 4     | 4     | 4     |
| Flow depth $H(\text{cm})$                  | 7.96  | 7.19  | 9.61  |
| Mean flow velocity $U_m(\text{cm/s})$      | 12.56 | 13.91 | 10.41 |
| Friction flow velocity $U_* (\text{cm/s})$ | 16.24 | 19.45 | 19.18 |
| Channel slope $I_0$                        | 1/500 | 1/500 | 1/500 |
| Froude number $U_m(gH)^{1/2}$              | 0.14  | 0.17  | 0.11  |
| Reynolds number $U_m H/\nu$                | 10000 | -     | -     |

$\mu\text{s}$  に設定し、水路上方から底面に垂直下向きに照射した。レーザー光とハイスピード・ビデオカメラを同期させて読み込まれた可視化画像は、125fps(frame per second), 1024×1024(pixel) のモノクロビデオ画像としてコンピュータ上のハードディスクに記録され、PIV 法により画像処理された。高解像度の CCTV レンズは焦点距離が 50mm, 1 pixel の最小サイズは 0.09mm である。流速のサンプリング周波数は 62.5Hz, 1 計測面での画像データは 4000 枚、計測時間は 32sec であった。なお、トレーサーとして粒径  $100\mu\text{m}$ , 比重 1.02 のナイロン粒子をアルコール液で十分に攪拌して水中に注入した。

## 3. 大規模渦の抽出および解析法

乱流中における管状および層状の形をとる高渦度領域を組織構造と定義し、それぞれ渦管 (vortex tube) および渦層 (vortex layer) と呼ぶ。渦構造の中心に渦度が集中することに基づいて、渦度自体の大きさを閾値として渦構造を抽出する方法が用いられてきた。しかし、渦度には対称テンソルのせん断変形速度と反対称テンソルの回転運動との両者の寄与が含まれているため、渦度の高い領域が、必ずしも回転運動とは対応していない<sup>9)</sup>。

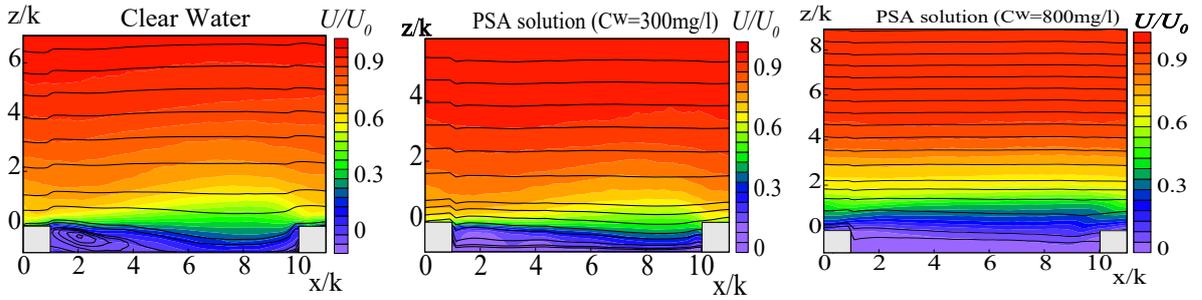


図-4 時間平均流の主流速成分のカラーコンター

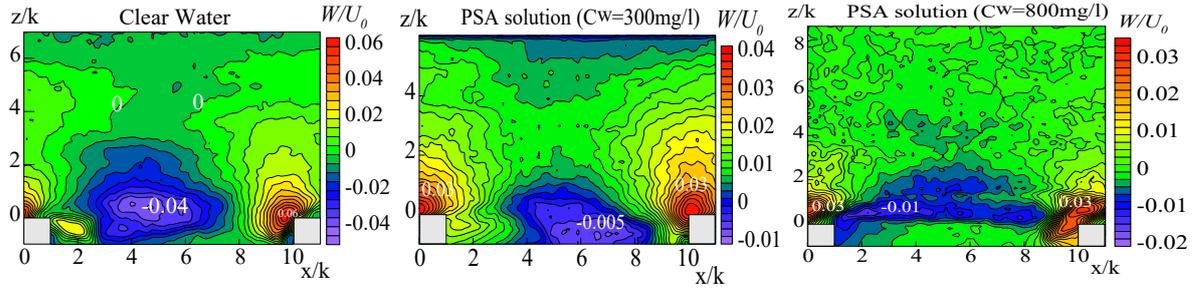


図-5 時間平均流の鉛直流速成分のカラーコンター

渦構造のダイナミクスを議論するためには、複雑な乱流場の中から渦管を分離抽出する必要がある。この管状旋回渦の組織構造は、直接可視化する方法が提案され、そのメカニズムや詳細な特性が明らかにされつつある<sup>7)</sup>。

本研究では管状旋回渦の抽出に以下の  $Q$  定義法<sup>9)</sup> を適用し考察する。

$Q$  定義法は、速度勾配テンソル  $\nabla u$  の第 2 不変量  $Q$  が正となる領域を管状旋回渦と定義する。これは、第 2 不変量  $Q$  が次式

$$Q \equiv \frac{1}{2}(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = -\frac{1}{2}u_{i,j}u_{j,i} \\ = \frac{1}{2}(\|\Omega_{i,j}\|^2 - \|S_{i,j}\|^2) \quad (1)$$

によって表され、上式右辺第一項の渦度テンソルのノルムが右辺第二項の変形速度テンソルのノルムより卓越する場合、 $Q$  が正になることを利用している。ここに、変形速度テンソルおよび渦度テンソルは次式で表される。

$$S_{i,j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \Omega_{i,j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2)$$

一方、この条件は圧力ポアソン方程式

$$\nabla^2(p/\rho) = 2Q \quad (3)$$

のソース項とも対応することから、 $Q > 0$  の領域は、圧力の極小値をもち局所低圧部分であることを示すとともに、 $Q$  が大きいほどより強い渦であることを示す。

なお、横断方向に一樣な二次元角柱粗度上の流れとは言え、大規模渦は三次元的挙動を示すが、DNS 解析や LES 解析で捉えられた組織渦の様に立体視は出来ない。

#### 4. 平均流および乱れ特性

図-4 は、清水流、PSA 溶液の濃度  $C_w=300 \text{ mg/l}$  (Kaolin 体積土砂濃度  $C_t=6\%$  に相当) および  $C_w=800 \text{ mg/l}$  (Kaolin 体積土砂濃度  $C_t=10\%$  に相当) における時間平均流の主流速成分のカラーコンターを示す。なお、図中の実線は以下の式(4)で定義される流れ関数  $\psi$  の等値線を示す。

$$\psi(x, z) = \int_0^z U(x, \zeta) d\zeta \quad (4)$$

ここに、 $U$  は時間平均流速である。図より、清水流では粗度頂部から剥離した流線 ( $\psi = 0$ ) は、 $x/k=4.5$  において粗度キャビティーの水路床面に再付着していること、剥離線より下層では、循環流が形成されることが認められる。再付着点位置は一般的な砂堆の位置に近い。また、主流速の等値線は、粗度キャビティー内では下に凸、粗度上層では上に凸の形状である。一方、PSA 溶液の濃度  $C_w=300 \text{ mg/l}$  および  $C_w=800 \text{ mg/l}$  では、流線の剥離は認められず、粗度キャビティー内においても清水流に較べ流線は水路床面に平行に近い。主流速の等値線は、PSA 溶液の濃度  $C_w=300 \text{ mg/l}$  では清水流のパターンに類似しているが、 $C_w=800 \text{ mg/l}$  では清水流とは大幅に異なり流下方向に大きな変化は無く、 $C_w=300 \text{ mg/l}$  および  $C_w=800 \text{ mg/l}$  では水面近傍で主流速は鉛直方向に変化は小さく、その傾向は  $C_w=300 \text{ mg/l}$  で強くなるのが分かる。

図-5 は、清水流、PSA 溶液の濃度  $C_w=300 \text{ mg/l}$  および  $C_w=800 \text{ mg/l}$  における時間平均流の鉛直流速成分のカラーコンターを示す。清水流および  $C_w=300 \text{ mg/l}$  では鉛直流速成分  $W$  は、粗度の直上流近傍で強い上昇流、直下流近傍

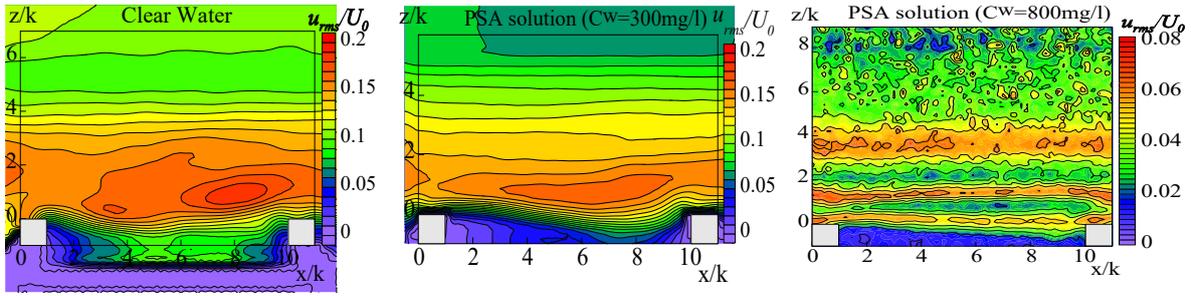


図-6 乱れの強さのカラーコンター

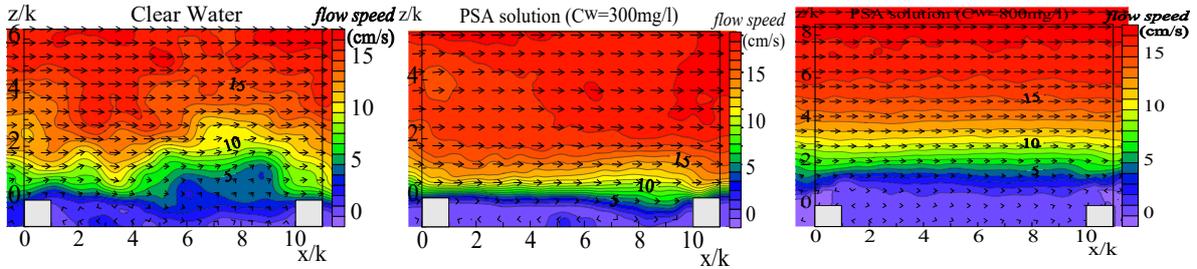


図-7 瞬時流速ベクトルおよび主流速コンター

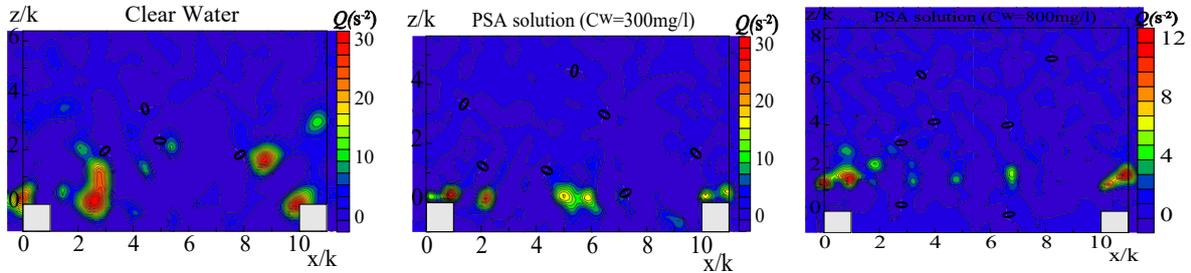


図-8 瞬時速度勾配テンソルの第2不変量 $Q$

で弱い上昇流，粗度キャビティー中央部で広い範囲に亘って弱い下降流が共通して発生していることが認められる．その極大値は清水流ではコーナ二次流と同程度<sup>8)</sup>，PSA溶液の濃度の増大に伴って小さくなるのが分かる．また，上昇流および下降流は，半水深より上層で半減しており，粗度キャビティー境界面における運動量輸送は小さく，特に $C_w=800\text{ mg/l}$ では無視出来る程度である．

図-6は，清水流，PSA溶液の濃度 $C_w=300\text{ mg/l}$ および $C_w=800\text{ mg/l}$ における乱れの強さ $u_{rms}/U_0$ のカラーコンターを示す．乱れの強さの極大値が発生する位置を流下方向に空間平均した位置は，清水流では $z/k=0.27$ に対してPSA溶液 $C_w=300\text{ mg/l}$ においては粗度頂部近傍の $z/k=0.25$ ， $C_w=800\text{ mg/l}$ ではほぼ流下方向にその高さが若干上昇する傾向にあるが，平均的には $z/k=0.27$ ， $z/k=1.44$ および $z/k=3.59$ の3箇所の位置で認められ，主流速の変曲点位置とほぼ対応している．

乱れの強さは，清水流と比べて高粘性のPSA溶液 $C_w=300\text{ mg/l}$ においては，粗度キャビティー近傍では類似の傾向を示すが， $z/k>3$ の領域では急減し，水面近傍では50%程度， $C_w=800\text{ mg/l}$ においては，極大値は清水流の場合の20%程度まで低減し，水面付近では極めて小さいことが認められる．

## 5. 大規模渦の解析結果

### (1) 瞬間速度場と第2不変量 $Q$

図-7は，清水流，PSA溶液濃度 $C_w=300\text{ mg/l}$ および $C_w=800\text{ mg/l}$ における瞬時流速場の主流速コンターおよび流速ベクトルを，図-8は同一時刻における速度勾配テンソルの第2不変量 $Q$ のコンターを示す．なお，第2不変量 $Q$ が正の場合のみを抽出している．清水流では粗度頂部を結ぶ線上近傍では主流部とキャビティーの間で乱れによる運動量交換が活発で，主流速コンターは強い波状性を示すがPSA溶液濃度の増大に伴い主流速の空間変化は小さく，鉛直方向の流速成分を小さくなるのが分かる．同一時刻の第2不変量 $Q$ の瞬時値は，相対的に清水流で最も大きく，PSA溶液濃度の増大に伴い小さくなる．特に，清水流，PSA溶液濃度 $C_w=300\text{ mg/l}$ では角柱粗度近傍で明瞭に大規模渦の発生が認められるが， $C_w=800\text{ mg/l}$ では，大規模渦は粗度下流部付近で大きく減衰する．

### (2) 第2不変量 $Q$ の時間平均値

図-9は，第2不変量 $Q$ の時間平均値の空間分布を示す．但し， $Q$ が正の場合のみを抽出し統計処理した．

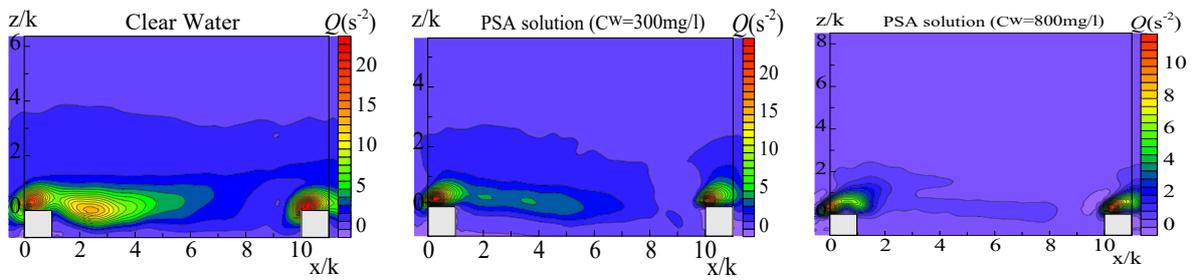


図-9 第2不変量 $Q$ の時間平均値の分布

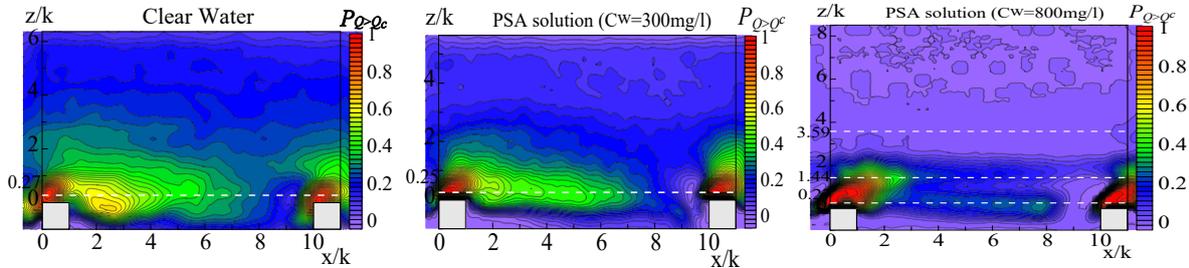


図-10 渦の出現確率 $P_{Q>Q_c}$ の分布 ( $Q_c = 1.0$ )

清水流では、粗度頂部で発生した剥離渦が、粗度背後の自由せん断層において発達し強い渦となり流下していること、大規模渦の軌跡はせん断速度の極大値位に対応していることが示唆される。

PSA 溶液濃度  $C_w=300$  mg/l において、第2不変量  $Q$  は、粗度キャビティー境界面において大きな値を示し、 $x/k=2, 3.5$  で極大値がみられるが、清水流に比べて顕著ではない。

PSA 溶液濃度  $C_w=800$  mg/l では、第2不変量  $Q$  は粗度近傍でのみ大きな値を示し、その他では渦の発生は見られない。

一般的に  $Q$  の時間平均値は、主流速の変曲点との対応が良く変曲点不安定により渦の発生し易い場所であること、PSA 溶液濃度に伴って小さくなり以下の関係が認められる。

$$Q(C_w=0 \text{ mg/l}) > Q(C_w=300 \text{ mg/l}) \gg Q(C_w=800 \text{ mg/l}) \quad (5)$$

また、粗度頂部近傍は剥離渦の発生場所で低圧力渦の出現が示唆される。

### (3) 第2不変量 $Q$ による大規模渦の出現確率

PSA 溶液濃度  $C_w=800$  mg/l では粘性の増大に伴い渦の発生が抑制されていても、大規模渦が生じている可能性の高い領域が考えられる。そこで、渦検出法として、次の式(6)で定義される渦の出現確率を用いる。

$$P_{Q>Q_c} = n_{Q>Q_c}/n \quad (6)$$

ここに、 $n$  : 各計測点の第2不変量  $Q$  データ総数 (=2000) ,  $n_{Q>Q_c}$  :  $Q > Q_c$  となるデータ総数である。

図-10は、 $Q_c = 1.0$  に設定した大規模渦の出現確率の空間分布を示しており、図-8における大規模渦発生位

置を良好に示している。出現確率の極大値の発生位置は、第2不変量  $Q$  の時間平均値のそれに類似してはいるが、空間的広がりは大いことが分かる。なお、図中に示された破線は乱れの強さ  $u_{rms}$  の極大値の位置を示す<sup>5)</sup>。

PSA 溶液濃度  $C_w=800$  mg/l における  $z/k=3.59$  を除いて何れのケースにおいても大規模渦の出現確率の極大値は乱れの強さ  $u_{rms}$  の極大値の位置にほぼ対応しており、渦により乱れが誘起されていることが示唆される。

### (4) スペクトル解析

図-11は、座標  $(x/k, z/k)=(2, 0)$  における清水流、PSA 溶液濃度  $C_w=300$  mg/l および  $C_w=800$  mg/l における主流方向の流速変動成分  $u'$  および鉛直方向の流速変動成分  $w'$  のパワースペクトル密度分布を示す。なお、図中の実線はコルモゴロフの慣性小領域のカスケード過程を示すコルモゴロフの  $-5/3$  乗則を示す。清水流では、コルモゴロフの慣性小領域の存在が認められるが PSA 溶液濃度  $C_w=300$  mg/l および  $C_w=800$  mg/l においては乱れエネルギー減衰が大きく、慣性小領域の存在は認められない。卓越周波数は、清水流、PSA 溶液濃度  $C_w=300$  mg/l および  $C_w=800$  mg/l で、各々、0.8 Hz、0.4 Hz および 0.13 Hz であり、PSA 溶液濃度の増大に伴い発生周波数は小さくなり、渦の発生頻度は下がっていることが分かる。

高濃度土砂による粘性係数の増大は、エネルギースペクトルを減少させると同時に、大規模渦の発生頻度および強さを抑え、乱れの生成を抑制している。このことから、PSA 溶液濃度  $C_w=300$  mg/l において形状抵抗が小さくなったこと、PSA 溶液濃度  $C_w=800$  mg/l では形状抵抗は無視出来るが摩擦抵抗が支配的となったことが認められる。

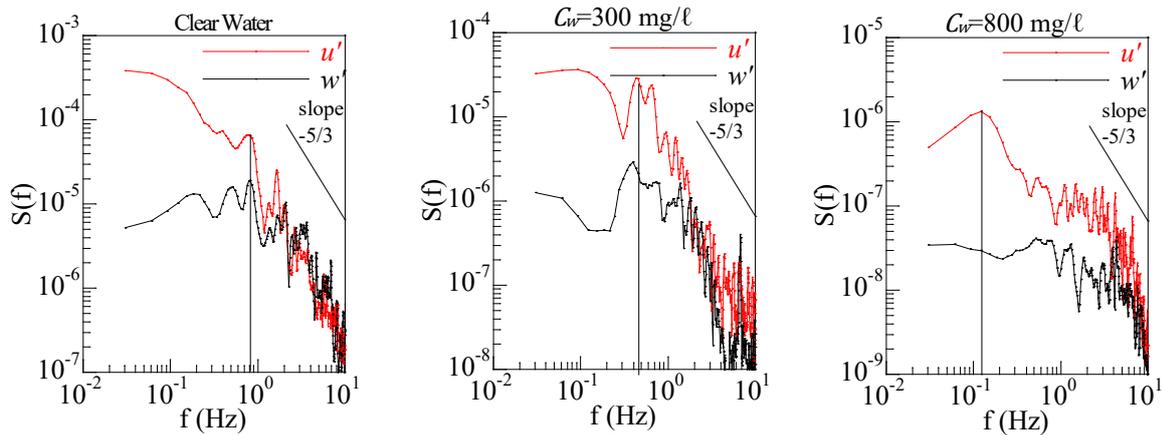


図-11 主流方向および鉛直方向成分の変動流速成分のパワースペクトル密度分布

## 6. まとめ

本研究では、二次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂の粘性増大が大規模渦構造に与える影響を明らかにするため、高濃度土砂流の模擬流体としてPSA溶液を用い、流速の計測にはPIVを適用し、速度勾配テンソルの第2不変量であるQ定義法により大規模渦を同定し、その動特性を清水流との比較を通して詳細に検討した。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) 第2不変量 $Q$ の瞬時値は、相対的に清水流で最も大きく、PSA溶液濃度の増大に伴い小さくなる。
- 2) 第2不変量 $Q$ の時間平均値は、主流速の変曲点との対応が良く変曲点不安定により渦の発生し易い場所で大きく、PSA溶液濃度の増大に伴い小さくなる。
- 3) PSA溶液濃度 $C_w=800$  mg/lにおける $z/k=3.59$ を除いて何れのケースにおいても大規模渦の出現確率の極大値は乱れの強さの極大値の位置にほぼ対応した。
- 4) 高濃度土砂による粘性係数の増大は、エネルギースペクトルを減少させると同時に、大規模渦の発生頻

度および強さを抑え、乱れの生成を抑制している。

## 参考文献

- 1) Matthes, G.H. : Macroturbulence in natural stream flow, Amer. Geophys. Union, Vol.28, pp.255-265, 1947.
- 2) Jackson, R.G. : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, J. Fluid Mech., Vol.77, pp. 531-560, 1976.
- 3) Ichisa Nezu and Hiroji Nakagawa. : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR - Monograph, Balkema, 1993.
- 4) 大本照憲, 西将吾 : 角柱粗度を有する開水路流れの運動量輸送に与える高濃度土砂の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol.70 No.2, I\_807-I\_817, 2014.
- 5) 西将吾, 大本照憲 : 角柱粗度を有する粗面乱流における高濃度土砂流の抵抗特性およびエネルギー収支, 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol.72 No.2, I\_515-I\_525, 2016.
- 6) Davidson P.A. : Turbulence-An Introduction for Science and Engineering, Oxford University Press, 2003
- 7) Jeong, J. & Hussain, F. : On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol.285, pp.69-94, 1995.
- 8) 林俊一郎, 大本照憲, 本田逸郎 : 直接数値シミュレーションによる開水路隅角部の三次元乱流構造の解明, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.80-99, 2006.2

(Received June 30, 2020)  
(Accepted August 28, 2020)

## EFFECTS OF HYPER-CONCENTRATED SEDIMENT ON LARGE SCALE COHERENT VORTEX IN AN OPEN CHANNEL WITH SQUARE RIBS

Kanji ADACHI, Terunori OHMOTO and Hiroto KONDO

The hyper-concentrated sediment laden flows have caused flood control, river environment and irrigation problems such as aggradation and clogging. Several researchers documented the effects of large concentrations of sediments on the fluid properties such as the viscosity, the density, and the reduction of fall velocity of bed sediment particles, the increase of sediment discharge. However, such a sediment flow feature has not been investigated in detail on the effects of suspended clay concentration on large scale vortex structure. In this paper, we experimentally investigated velocity fluctuations in hyper-concentrated sediment laden-flow in an open channel with two-dimensional square ribs by using Particle Image Velocimetry(PIV). The results showed that rheological properties significantly dissipated the large scale coherent vortex identified on the second invariant of the velocity gradient tensor over the bed with square ribs by comparison with the clear water flow.